

基于Unity的推移装置应力场实时预测仿真系统设计

刘亭序, 王剑松

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年9月19日; 录用日期: 2026年10月12日; 发布日期: 2026年10月20日

摘 要

针对复杂装备运行过程中结构应力状态难以实时获取和直观分析的问题, 本文设计并实现了一种基于Unity的应力场实时预测仿真系统。系统以三维仿真场景为基础, 将仿真对象的运动状态与发电机重力、起升高度和装置侧向力等工况参数进行统一组织, 并以有限元计算数据为基础建立应力场代理模型, 实现不同工况下结构应力场的快速预测。在此基础上, 通过数据传递与动态更新机制, 将预测结果映射至三维模型表面, 并利用Shader实现应力云图的动态可视化, 从而建立工况参数、应力预测与三维显示之间的关联。结果表明, 该系统能够根据当前工况快速获得对应的应力场分布, 并实现预测结果与仿真状态的同步更新, 为复杂装备运行过程中的应力状态实时预测与可视化分析提供了一种可行的实现方法。

关键词

推移装置, 三维仿真, 应力场预测, 应力云图, 实时可视化

Design of a Unity-Based Real-Time Stress Field Prediction and Simulation System for Push Devices

Tingxu Liu, Jiansong Wang

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: September 19, 2026; accepted: October 12, 2026; published: October 20, 2026

Abstract

To address the difficulty of obtaining and intuitively analyzing structural stress states during the

operation of complex equipment, a Unity-based simulation system for real-time stress field prediction is designed and implemented. Based on a three-dimensional simulation environment, the system organizes the motion state of the simulated object together with operating parameters including generator gravity, lifting height, and lateral force. A stress field surrogate model is established based on finite element simulation data to achieve rapid prediction of structural stress fields under different operating conditions. Furthermore, through data transmission and dynamic updating mechanisms, the predicted results are mapped onto the surface of the three-dimensional model, and a Shader-based visualization method is employed to generate dynamic stress cloud maps. This establishes an integrated process connecting operating conditions, stress prediction, and three-dimensional visualization. The results show that the proposed system can rapidly obtain the corresponding stress field distribution according to the current operating conditions and synchronously update the prediction results with the simulation state, providing a feasible approach for real-time stress prediction and visual analysis during the operation of complex equipment.

Keywords

Pushing Device, Three-Dimensional Simulation, Stress Field Prediction, Stress Cloud Map, Real-Time Visualization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着机械装备运行工况不断变化, 结构所承受的载荷及运动状态也随之改变, 如何快速获得关键结构的应力状态并进行直观展示, 是装备运行状态分析中的重要需求。在实际工程应用中, 有限元方法能够获得结构在不同工况下的应力分布, 但当分析对象和工况数量增加时, 重复进行完整数值计算会产生较大的计算开销。因此, 面向动态工况建立快速应力响应计算方法, 并将计算结果实时反馈至仿真系统, 具有一定的工程应用价值。

针对有限元计算效率问题, 近年来研究人员提出多种快速响应方法。高泽等[1]利用有限元仿真生成样本数据, 并通过图网络建立输入参数与结构应力场之间的映射关系, 实现了汽车零部件应力场的快速预测, 其计算速度较对应有限元求解提高了 3 个数量级以上。罗金文等[2]将有限元分析与代理模型结合, 建立水轮机顶盖物理场实时监测体系, 通过代理模型实现物理场的快速计算和实时映射。闫月晖等[3]采用降阶与代理模型方法对结构全局瞬态响应进行重构, 实现了应力场和位移场的快速预测。翟越等[4]将结构监测数据与有限元模型进行关联, 实现了数字孪生环境下的结构安全实时预测分析。上述研究表明, 面向实时应用的结构分析可以通过离线数值计算建立样本数据, 再利用代理模型或数据驱动方法建立工况参数与结构响应之间的映射关系, 从而避免运行过程中重复进行完整有限元求解。

另一方面, 三维仿真技术为计算结果的动态呈现提供了实现平台。任福深等[5]基于 Unity3D 构建了水下机器人半实物仿真系统, 实现了虚拟对象与实际运动状态的同步以及运行参数的实时监测。殷民艇等[6]利用 Unity3D 建立机床三维模型, 并实现了模型运动和交互控制。陈有鹏等[7]基于 Unity 构建机器人实时 3D 数字孪生终端, 实现了虚拟场景与机器人状态之间的实时交互。王进峰等[8]将 Unity3D 应用于数控机床数字孪生系统, 实现了设备运行状态、数据可视化和加工过程仿真。相关研究表明, Unity 能够为机械装备三维场景构建、运行状态模拟和数据可视化提供较好的实现环境。

基于上述研究, 本文面向推移装置运行过程中的应力状态实时预测与可视化需求, 设计并实现基于 Unity 的应力场实时预测仿真系统。系统以三维仿真场景为载体, 将发电机重力、起升高度和装置侧向力作为主要工况参数, 采用有限元计算数据构建应力场代理模型, 通过建立工况参数与应力场之间的映射关系, 实现运行过程中的应力场快速预测。在此基础上, 将预测结果传递至三维模型, 并通过应力数据与颜色信息的映射实现应力云图的动态显示, 从而形成“工况参数输入 - 应力场快速预测 - 三维云图显示”的实时处理流程, 为推移装置运行过程中的结构应力状态分析提供一种三维可视化实现方法。

2. 系统总体设计

2.1. 推移装置结构与工作原理

柴油发电机推移装置主要用于柴油发电机的吊装、拆卸、转运及就位安装。装置整体由主梁、横梁、二级吊梁、吊具、内臂、顶升油缸、顶升活塞杆及运行机构等部分组成, 如图 1 所示。其中, 主梁和横梁构成装置的主要承载框架, 二级吊梁和吊具用于连接发电机吊点并传递载荷, 顶升油缸与顶升活塞杆组成顶升机构, 实现吊装高度的调节, 运行机构则用于实现装置沿轨道方向的水平移动。

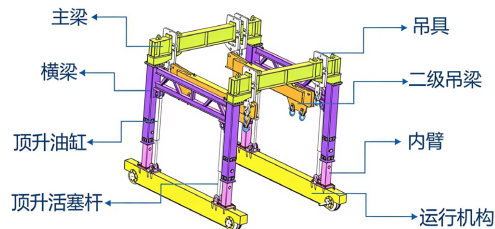


Figure 1. Structural diagram of the push device

图 1. 推移装置结构图

装置工作时, 首先通过运行机构将推移装置移动至柴油发电机附近, 然后利用顶升机构调节吊梁高度, 使吊具与发电机吊点对正并完成连接。连接完成后, 顶升机构继续起升, 使发电机脱离原有支撑, 随后由运行机构带动推移装置及发电机沿轨道移动至目标位置, 最后通过顶升机构下降完成发电机的就位。整个过程中, 发电机重力通过吊具、二级吊梁逐级传递至主梁、横梁及顶升机构, 并最终由运行机构传递至轨道支撑。因此, 推移装置的结构受力状态与起升高度、发电机重力及运行过程中的侧向载荷密切相关。

2.2. 工况参数与有限元模型

为分析不同运行状态下推移装置的应力分布, 结合其实际工作过程及主要载荷传递特点, 选取起升高度 H 、发电机重力 G 和侧向力 F 作为主要工况参数。其中, 起升高度决定顶升机构的伸出长度, 并会引起装置整体几何构型发生变化; 发电机重力是推移装置承受的主要竖向载荷, 直接影响结构整体受力水平; 侧向力用于表征吊装偏心、运行扰动等因素引起的横向载荷。三个参数取值情况如表 1 所示。

Table 1. Values of working condition parameters

表 1. 工况参数取值表

工况参数	最小值	最大值
起升高度/mm	325	625
发电机重力/KN	200	500
侧向力/KN	1.0	3.5

有限元模型的模型材料选择为结构钢, 网格划分采用整体 35 mm 的基础网格尺寸, 并在连接部位、接触区域、载荷传递路径以及若干重要受力部位进行局部加密, 加密后单元尺寸为 10 mm, 以提高关键区域应力响应的分辨能力。边界条件方面, 位移约束共设置为四块区域, 对应装置与滚轮相接触的面上, 对它们分别进行限制 X、Y、Z 方向的位移来进行约束。载荷条件包括结构自重、发电机重力和侧向载荷三部分。其中, 结构自重通过标准重力施加; 发电机重力通过两根吊梁上的四个吊装孔等分施加于装置上部, 以模拟发电机吊装载荷; 侧向工况通过在装置一侧施加外载来表征横向扰动或偏载作用, 如图 2 所示。

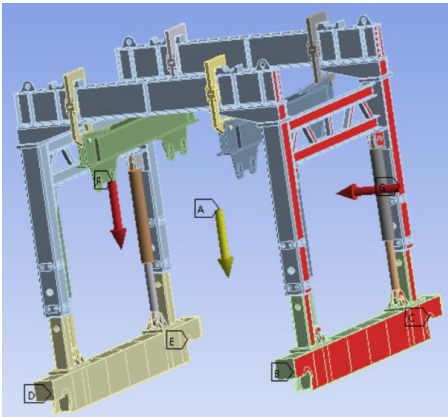


Figure 2. Schematic diagram of finite element analysis
图 2. 有限元分析示意图

2.3. 系统总体设计方案

本文以应力场实时预测为核心, 面向装备运行过程中的结构应力状态分析需求, 设计了一套基于 Unity 的三维实时预测仿真系统。系统以三维仿真场景为基础, 将仿真对象的运动状态、工况参数与应力场预测结果进行关联, 通过统一的数据传递与更新机制, 实现运行状态、工况参数和应力预测结果之间的同步, 并最终三维应力云图形式直观呈现结构应力分布。

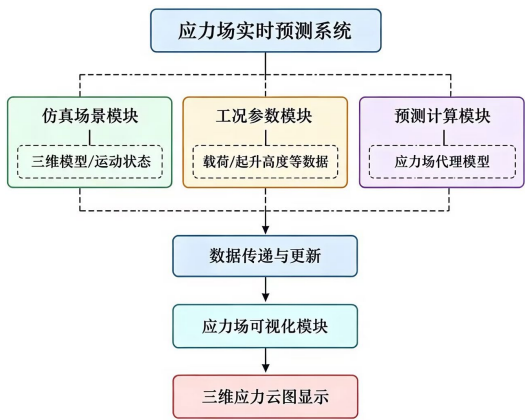


Figure 3. Overall design of the system
图 3. 系统总体方案

系统总体方案如图 3 所示, 主要由仿真场景模块、工况参数模块、预测计算模块和应力场可视化模

块组成。仿真场景模块负责构建三维模型及其运动状态, 为系统提供运行仿真环境; 工况参数模块负责设置发电机重力、侧向力和起升高度等主要工况参数, 用于描述不同运行状态下的载荷条件; 预测计算模块以应力场代理模型为基础, 根据当前工况参数快速获得对应的应力场预测结果; 应力场可视化模块将预测结果映射至三维模型表面, 实现结构应力分布的动态显示。

系统各模块之间采用数据传递的方式进行关联。当仿真对象运行状态或工况参数发生变化时, 系统获取当前工况信息, 并将其传递至预测计算模块。预测计算模块根据当前参数调用应力场代理模型, 获得相应的应力场预测结果, 再将结果传递至可视化模块。可视化模块根据新的预测数据更新三维模型表面的颜色信息, 从而形成与当前工况相对应的三维应力云图。

通过上述设计, 系统将仿真场景、工况参数、应力场预测和结果可视化进行统一组织, 使工况参数变化能够及时反映到应力预测结果中, 为装备运行过程中的应力场实时预测和三维可视化提供系统基础。

2.4. 应力场实时预测方案

为满足装备运行过程中应力场快速获取的需求, 本文采用基于有限元计算、POD (Proper Orthogonal Decomposition) 降阶与神经网络代理模型相结合的应力场实时预测方法。其基本思路是首先通过多工况有限元计算获得不同工况下的结构应力场数据, 在此基础上利用 POD 方法提取应力场的主要变化特征, 将高维应力场转换为低维模态系数; 然后建立工况参数与 POD 模态系数之间的非线性映射关系, 并利用神经网络实现模态系数的快速预测, 最后通过 POD 重构得到当前工况下的完整应力场, 从而避免运行阶段重复进行有限元计算, 应力场实时预测方案如图 4 所示。

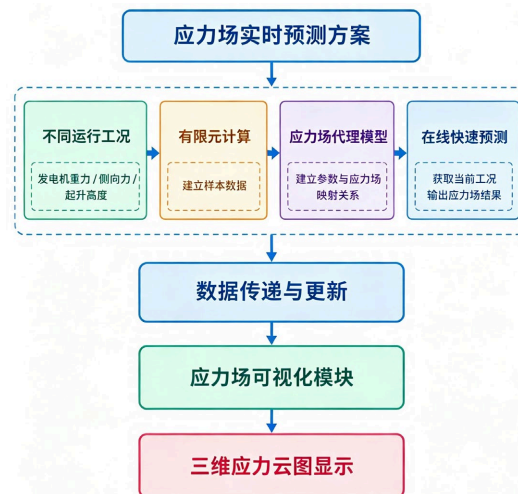


Figure 4. Real-time stress field prediction scheme

图 4. 应力场实时预测方案

设当前工况参数为

$$x = [H, G, F]^T \quad (1)$$

其中, H 、 G 和 F 分别表示起升高度、发电机重力和装置侧向力。通过有限元计算可以获得不同工况下的应力场样本, 并将多个工况的应力场组成应力场快照矩阵。在 POD 降阶过程中, 通过提取应力场样本中的主要空间特征, 得到若干阶 POD 模态。对于第 m 个工况, 其应力场可近似表示为

$$\sigma^{(m)} \approx \bar{\sigma} + \sum_{r=1}^R a_r^{(m)} \phi_r \quad (2)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 为应力场均值, ϕ_r 为第 r 阶 POD 模态, $a_r^{(m)}$ 为对应的模态系数, R 为保留的 POD 模态阶数。通过 POD 降阶, 可以将原始高维应力场转换为少量模态系数, 为后续快速预测提供低维输出变量。

在此基础上, 采用神经网络建立工况参数与 POD 模态系数之间的映射关系, 可表示为

$$\hat{a} = f_{\theta}(x) \tag{3}$$

其中, x 为当前工况参数, $\hat{a}$ 为神经网络预测得到的 POD 模态系数, f_{θ} 表示训练得到的神经网络模型。系统运行时, 只需将当前工况参数输入神经网络, 即可快速获得对应的模态系数, 再结合 POD 模态进行应力场重构, 得到当前工况下的应力预测结果。

通过上述方法, 将计算量较大的有限元分析过程放在系统运行前完成, 运行阶段仅进行工况参数输入、神经网络推理和应力场重构, 从而降低实时预测过程中的计算量, 实现应力场预测结果与三维仿真状态的同步更新。

2.5. 模型验证与性能分析

为验证应力场代理模型的预测精度, 本文设置独立验证工况对模型进行测试。验证工况的输入参数与模型训练阶段保持一致, 仍采用起升高度 H 、发电机重力 G 和装置侧向力 F 作为输入变量, 各参数均在模型设定的取值范围内进行选取。共设置 30 组独立验证工况, 验证工况未参与神经网络模型的训练, 且与训练样本不重复。将上述工况参数分别输入有限元模型和应力场代理模型, 以有限元计算结果作为对比基准, 对代理模型的预测精度进行评价, 误差情况如表 2 所示。

Table 2. Error statistics of the surrogate model

表 2. 代理模型误差统计表

评价指标	平均值/%	标准差/%
最大相对误差	9.3530	3.4595
平均相对误差	2.5061	1.2161
相对均方根误差	3.5945	0.9642

由上表可以看出, 30 组独立验证工况下代理模型的各项误差指标整体处于较低水平, 且标准差相对较小, 表明代理模型在不同运行工况下具有较为稳定的预测性能。

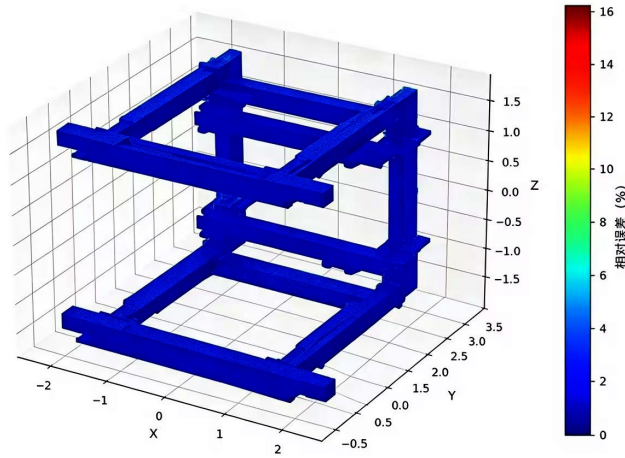


Figure 5. Error contour plots under typical working conditions
图 5. 典型工况误差云图

为进一步直观分析代理模型的预测效果, 选取典型验证工况 $H = 456$ 、 $G = 348567$ 、 $F = 2515$ 进行有限元计算结果与代理模型预测结果的对比, 并绘制相对误差云图, 如图 5 所示。由图可直观观察代理模型预测结果与有限元计算结果在应力分布上的差异。

3. 系统功能模块设计与实现

系统围绕应力场实时预测与三维可视化需求进行功能模块设计, 主要包括仿真场景模块、工况参数模块、预测计算模块和应力场可视化模块。各模块分别承担场景状态管理、工况数据组织、应力场快速预测以及预测结果可视化等任务, 并通过统一的数据传递过程实现各模块之间的信息关联。其中, 预测计算模块是系统的核心, 负责建立工况参数与应力场预测结果之间的映射关系, 并为后续应力云图显示提供数据。

3.1. 仿真场景模块

仿真场景模块主要用于构建推移装置的三维运行环境, 并模拟装置在不同工况下的运动状态。模块设计以三维场景为基础, 将仿真对象的运动过程与工况参数进行关联, 使场景状态能够反映实际运行过程中的主要变化。

在实现过程中, 对仿真对象的运动状态进行统一管理, 根据不同操作状态更新模型的位置和运动状态, 并将与预测相关的状态参数进行提取和整理。通过将场景控制与预测计算相互分离, 使仿真场景主要承担运动状态模拟和数据提供功能, 而不直接参与应力预测过程。

该模块的设计重点是建立仿真运动状态与预测输入之间的数据联系, 为后续工况参数处理和应力场预测提供基础数据。

3.2. 工况参数模块

工况参数模块主要负责系统运行过程中关键工况数据的输入、管理和传递。结合推移装置的运行特点, 选取发电机重力、起升高度和装置侧向力作为主要预测参数, 通过参数变化描述不同运行状态下的受力条件。

模块采用参数化设计思路, 将设置的工况信息统一转换为预测计算所需的数据形式, 并对参数变化进行实时更新。当工况发生改变时, 系统同步更新当前运行参数, 并将新的参数传递至预测计算模块, 从而形成工况变化与应力预测之间的实时关联。

该模块的重点并非参数操作本身, 而是建立统一的工况数据输入与传递机制, 保证预测模型能够获得准确、连续的输入数据。工况参数交互界面如图 6 所示。

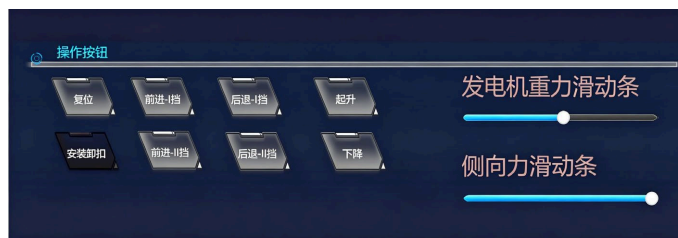


Figure 6. Interactive interface for working condition parameters

图 6. 工况参数交互界面

3.3. 预测计算模块

预测计算模块是系统实现应力场实时预测的核心模块, 主要负责将当前工况参数转换为对应的应力

场预测结果。系统运行过程中, 工况参数模块获取当前的发电机重力、起升高度和装置侧向力, 并按照预测模型的输入要求进行数据整理。随后, 将处理后的工况参数输入训练完成的预测模型, 得到当前工况对应的 POD 模态系数, 并进一步通过 POD 重构获得应力场结果。该过程将模型计算与仿真运行状态进行关联, 使工况参数发生变化时能够重新获得相应的应力预测结果。

预测得到的应力场数据经过处理后传递至应力场可视化模块, 并用于更新三维模型表面的应力分布。当仿真对象的运行状态或工况参数发生变化时, 系统重新执行预测与结果更新, 从而实现工况变化、应力预测和三维显示之间的同步。

该模块的实现重点在于预测模型与 Unity 仿真环境之间的数据连接和结果更新, 通过调用训练完成的预测模型完成在线快速推理, 避免运行过程中重复进行完整有限元计算, 为系统的实时应力场显示提供数据基础, 参数显示界面如图 7 所示。

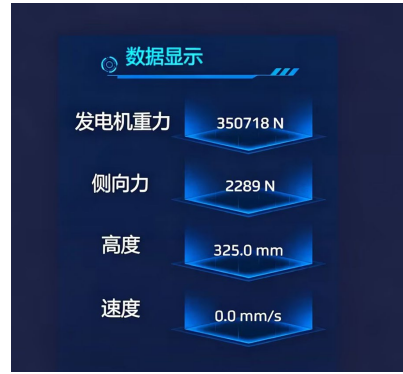


Figure 7. Parameter display interface
图 7. 参数显示界面

3.4. 应力场可视化模块

应力场可视化模块主要负责将预测计算得到的应力场数据转换为直观的三维显示结果, 使结构不同区域的应力分布能够在仿真场景中进行观察。

模块采用应力数据与颜色信息映射相结合的方法, 根据预测得到的应力数值建立应力大小与显示颜色之间的对应关系, 并将处理后的结果映射至三维模型表面。不同应力水平采用不同颜色进行表示, 从而形成连续的应力云图, 实现结构应力分布的直观表达, 三维应力云图可视化结果如图 8 所示。

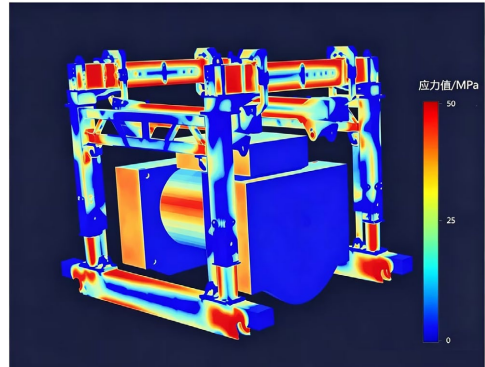


Figure 8. Visualization results of 3D stress contour plots
图 8. 三维应力云图可视化结果

当工况参数发生变化并完成新一轮预测后, 可视化模块同步更新应力数据和颜色分布, 使三维应力云图能够随工况变化进行动态更新。通过这种方式, 将抽象的应力场数值转换为具有空间分布特征的可视化结果, 实现工况变化 - 应力预测 - 云图显示之间的实时关联。系统在不同负载下的预测耗时如表 3 所示。

Table 3. Statistics of prediction time consumption
表 3. 预测耗时统计表

负载水平	模型预测耗时/s	云图刷新耗时/s	总响应时间/s
低负载	0.06	0.04	0.10
中负载	0.07	0.04	0.11
高负载	0.09	0.05	0.14

4. 结论

本文围绕应力场实时预测需求, 设计并实现了一套基于 Unity 的三维可视化仿真系统。系统以应力场预测为核心, 将仿真场景、工况参数、应力场代理模型和应力场可视化进行模块化设计, 通过数据传递实现仿真状态、工况参数与预测结果之间关联与同步。

在系统实现过程中, 利用 Unity 完成三维仿真场景及运动状态的构建, 通过工况参数模块获取发电机重力、起升高度和装置侧向力等数据, 并以有限元计算数据为基础建立应力场代理模型, 实现运行阶段应力场结果的快速预测。在此基础上, 将预测结果传递至三维模型, 并结合 Shader 和材质实现应力云图的动态显示, 使应力分布能够随工况变化进行更新。该方法避免了运行过程中重复进行完整有限元求解, 在降低在线计算开销的同时, 为应力场预测结果在三维仿真环境中的实时呈现提供了实现基础。

通过上述设计, 系统形成了“工况输入 - 状态更新 - 应力预测 - 云图显示”的完整数据流程, 能够直观反映不同工况下结构应力分布的变化。研究表明, 将应力场代理模型与三维仿真及可视化技术相结合, 能够实现运行工况变化下的应力场快速预测与三维动态显示, 为结构应力状态的实时分析提供了一种可行的实现方法。

参考文献

- [1] 高泽, 楚遵康, 石稼晟, 等. 基于图网络的汽车零部件应力场快速预测方法研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(1): 170-178.
- [2] 罗金文, 唐晓丹, 李初辉, 等. 水轮机顶盖模型物理场实时监测研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 281-288.
- [3] 闫月晖, 秦玉灵, 付梦思, 等. 基于代理模型的舱体力热耦合响应瞬态重构[J]. 空天技术, 2025(6): 1-12.
- [4] 翟越, 赵腾, 雷尚学, 等. 融合数字孪生技术的桥梁结构安全风险监测与预测方法[J]. 安全与环境学报, 2025, 25(8): 3069-3079.
- [5] 任福深, 孙雅琪, 胡庆, 等. 基于 Unity3D 的水下机器人半实物仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(8): 1546-1555.
- [6] 殷民艇, 董磊, 张星, 等. 基于 Unity3D 的机床加工系统设计与实现[J]. 制造技术与机床, 2022(5): 164-168.
- [7] 陈有鹏, 李会军, 王瑞超, 等. 基于 Unity 的机器人系统实时 3D 数字孪生终端设计[J]. 机械, 2022, 49(10): 15-22.
- [8] 王进峰, 问丛川, 花广如, 等. 基于 Unity3D 的数控机床数字孪生系统设计与实现[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(5): 443-448.